低線量被ばくによる生物発光現象への影響に関する研究

理工学部　物理学科　宇宙粒子研究室
学籍番号　10961052
氏名　政木　弘人

目次

1：実験背景と目的

2：バイオフォトンとは

3：^{137}Cs について

4：^{137}Cs から出ている放射線量の計算

5：実験装置の説明と実験の流れ

6：実験方法

7：実験結果

① 4.5mSv

② 9mSv

③ 13.5mSv

④ 18mSv

⑤ 実験装置のノイズ

８：考察

９：参考文献

１０：謝辞

１：実験背景と目的

本実験は低線量被ばくが生命活動に与える影響を調べるため、生物発光現象を使い測定を行うことを目的としている。2011 年 3 月 11 日に東北で地震が起こり、それを発端に東京電力福島第一原子力発電所が爆発する事故があった。この爆発事故によりセシウムがばら撒かれたが、ただちに人体に影響を及ぼすことはないとされている。現在、飲食物の摂取制限の基準（セシウムの場合）は飲料水・牛乳・乳製品で 200Ｂｑ/ｋｇ　肉・野菜・魚・穀類・卵などは 500Ｂｑ/ｋｇという厳しい基準を設けている。

また現在、福島では年間 20[mSv]を超える被ばく線量となる地域は避難指示が出されている。被ばく線量が 100[mSv]を超えるあたりから被ばく線量に依存して発ガンのリスクが増加すると示されているが、100[mSv]以下の被ばく線量では他の要因による発ガンの影響によって隠れてしまい放射線における発ガンのリスク増加は確認されていないとされている。

平成２年度から平成21年度までの日本の原子力発電施設の放射線業務従業者27万 7128 人を対象とした疫学的調査でも発ガンリスクの増加は確認できていない。

これらの報告を受け、低線量被ばくの影響を実験室で確認できないかと考えた結果、生物発光（バイオフォトン）現象に注目することにした。

生物は生命活動によって微弱な光（バイオフォトン）を放出している。

低線量被ばくにより生命活動になにか影響があれば、生物発光にも影響がでると考え研究を行うことにした。

2：バイオフォトンとは？

バイオフォトン（biophoton;生物フォトン）とは，生物がその生命活動に伴って放射している極めて弱い自発的発光です。

生体内での酸化的代謝過程における生体物質の化学的励起に主に起因するものであり，その発光強度は 10^{-16} W/cm^2(～10^3photon/s・cm^2)程度以下の紫外域から可視，近赤外波長領域の発光です。生物の生命活動や各種生理作用に付随して観測される発光ですが，ホタルや発光バクテリアなどの生物発光として知られている現象とは区別されます。生物発光はルシフェリン-ルシフェラーゼ反応として知られている酵素反応に基づいた，ある特定の発光代謝機構や発光器官を有する一部の生物種にみられる発光です。それに対しバイオフォトンは，通常の生化学反応過程で生じる活性酸素種やフリーラジカルなどを主にその起源とし，それらによる生体構成物質の酸化的修飾過程における励起分子の生成に由来するものです。バイオフォトンは生物種によらず生物一般において普遍的に観測されます。図１は，バイオフォトンの発光強度レベルを目でみることのできる光のレベルと比較して表したものです。

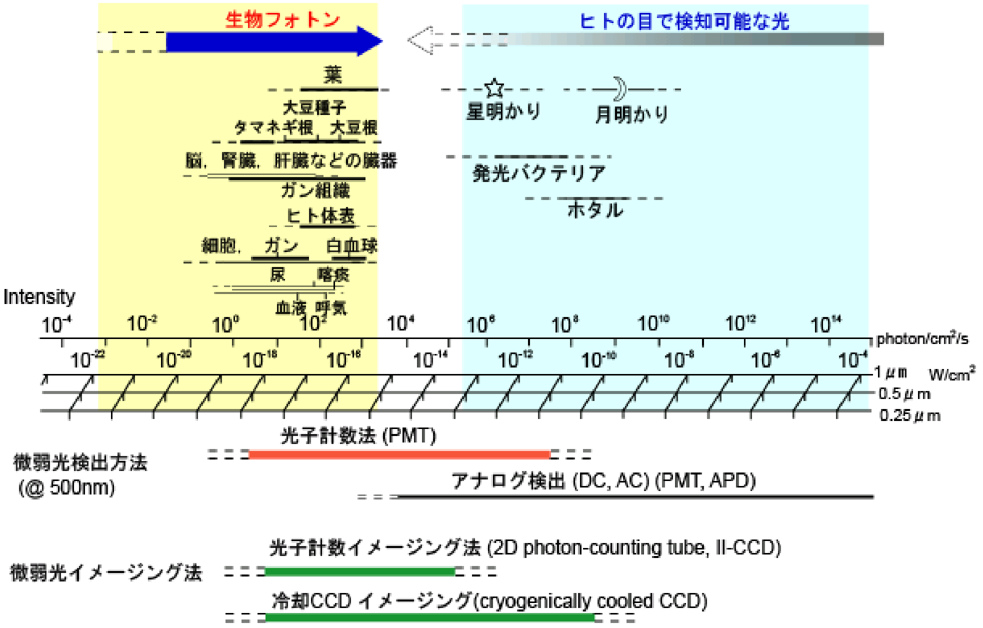


図１：発光強度レベル

3：^{137}Cs とは

^{137}Cs はセシウムの放射性同位体であり、質量数が 137 のものを指す。ウラン 235 などの核分裂によって生成する。
30.1 年の半減期を持ち、ベータ崩壊によりバリウム 137 の準安定同位体、すなわちバリウム 137m（137mBa，Ba-137m）になる（95 %の崩壊がこの同位体を作り、残りの 5 %が基底状態の同位体を作る）。バリウム 137m の半減期は約 2.55 分で、これはすべて核異性体転移によるものである。1 g のセシウム 137 の放射能の量は 3.215 TBq である。

バリウム 137m の光子エネルギーは 662 keV である。これらの光子は食品照射や癌の放射線療法に使われる。セシウム 137 は反応性が高く、扱いにくいので、工業用の X 線撮影にはあまり使われない。セシウム塩が水に非常に溶けやすいことも、扱いを難しくしている。^{60}C は反応性に乏しい金属で、高エネルギーγ線光子を放出するので、X 線撮影に適している。セシウム 137 は湿度計、密度計、流量計などの工業用計器にも使われている。

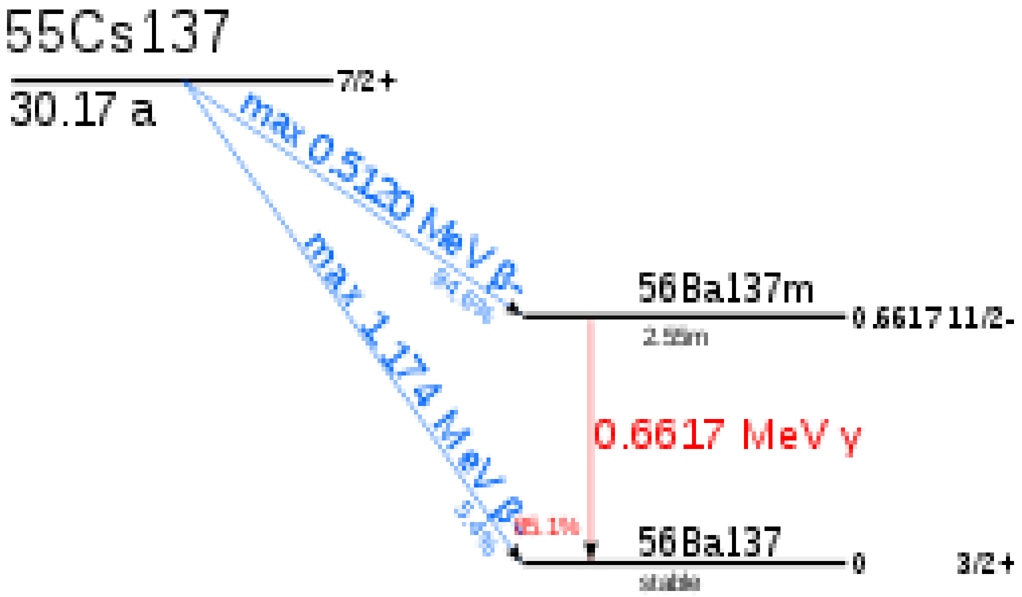
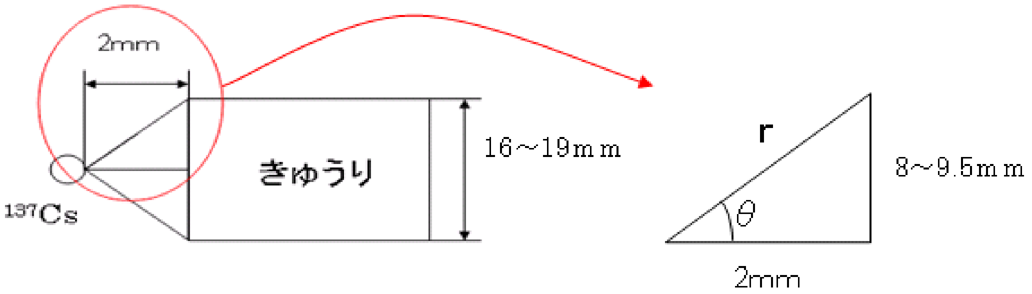


図 2：^{137}Cs の崩壊図

4：^{137}Cs から出ている放射線量の計算

今までのデータから甲南大学の Cs137 は 1 時間あたり 7000[Bq]放出している。
きゅうりの直径 16~19[ｍｍ]、線源までの距離 2[mm]である。この条件からきゅうりが
1 時間当たりに被ばくする線量[Sv]を計算する



まず直径が 19[mm]のとき

ピタゴラスの定理より斜辺の長さｒは　$r^2 = 2^2 + 9.5^2$

ｒ＝9.7[mm]　COS θ ＝2／ｒ＝2／9.7＝0.2　θ ＝78.4

3 次元で考えると立体角 Ω は　Ω＝2π ×COS^{-1}156.8＝2π×（1－COS156.8）

＝2π（1+0.91）となる。

よって、きゅうりの断面が 1 秒間に受ける放射線量[Bq]を A とするとは

A={7000×2π(1+0.91)}／4π [Bq]

^{137}Cs からでるβ線のエネルギーは 1.2×10^6 [eV]なので

A=｛(7000×1.91）×1.2×10^6｝／2　[eV]

単位を[eV]から[J]に変換　1eV=1.6×10^{-19} J

A= ｛(7000×1.91) ×1.2×10^{6} ×1.6×10^{-19} ｝／2 ＝12.83×10^{-10}

次に 1.2MeV のβ線の水中の最大飛程は 3.8[mm]

きゅうりの体積 V＝π× (9.5)^{2} ×3.8＝1.076[cm^3]

水の比重を 1[g/cm^3]とすると
β線が影響する部分のきゅうりの重さは 1.076[g]≒1[g]

単位[J]から[Sv]に変換　[J]／[kg]=[Sv]

よって A＝12.83×10^{-10} ／1×10^{-3}＝12.83×10^{-7} [Sv]

1 秒間あたり 12.83×10^{-7} [Sv]の放射線量を受ける

1 時間あたりだと　12.83×10^{-7}×3600＝46188×10^{-7}　[Sv] ≒4.6[mSv]

きゅうりの直径は 16～19[mm]
きゅうりの直径が 16[mm]のときはおよそ 4.5[mSv]となった

よってきゅうりに ^{137}Cs を使って 1 時間被ばくさせたときおおよそ
4.5～4.6[mSv]被ばくする。

5：実験装置の説明と実験の流れ

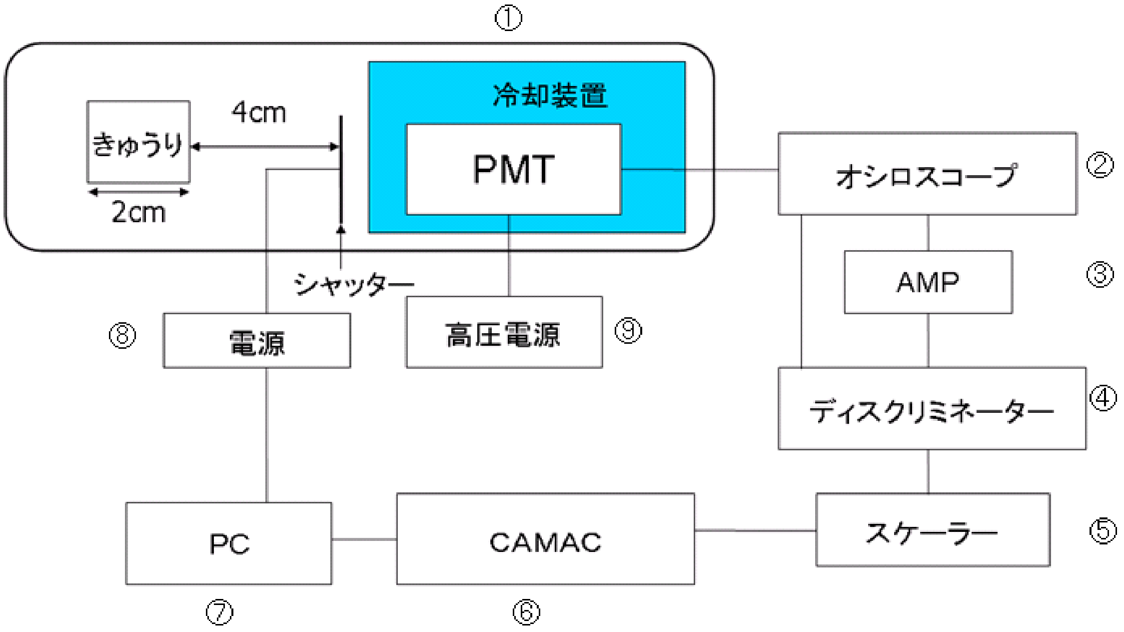


図３：実験装置図

使用した実験装置

① 光電子増倍管（PMT）
② オシロスコープ
③ ＡＭＰ
④ ディスクリミネーター
⑤ スケーラー
⑥ ＣＡＭＡＣ
⑦ ＰＣ
⑧ 電源
⑨ 高電圧

① 光電子増倍管（PMT）

光電子増倍管は光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電管を基本に、電流増幅機能を付加した高感度光検出器である。
高真空のガラス容器内に光電陰極、光電面、二次電子増倍陰極、陽極、およびその他の電極を封入した構造である。
入光窓から入射した光子は光電面に当たり光電効果により、金属内部の電子が飛び出します。飛び出した電子は印加電圧によって加速されて一段目の「ダイノード」に衝突します。ダイノードに衝突した電子は、加速で得たエネルギーを使ってダイノード内の電子を次々と飛び出させます。この飛び出した電子を二次電子といいます。二次電子はさらに、印加電圧によって加速され、次の段のダイノードに衝突し、新たな二次電子群を発生させます。これをどんどん繰り返し、初めは1個だった電子は最終ダイノードに達するときには初めの100万倍程度まで増加させる。
本実験での印加電圧は-1200[V]で実験を行った。

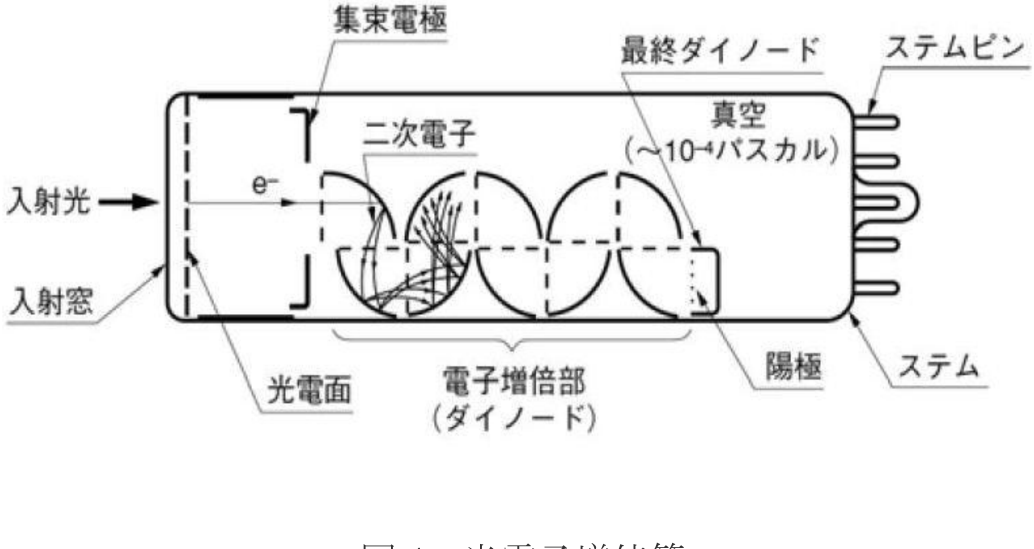


図4：光電子増倍管

② オシロスコープ

オシロスコープとは、時間の経過とともに電気信号（電圧）が変化していく様子をリアルタイムで描かせ、目では見えない電気信号の変化していく様子を観測できるようにした波形測定器。

光電子増倍管で観測する電子（電流）を抵抗に通して電圧に変化させ、オシロスコープで電圧の変化を表示する。

本実験では光電子増倍管からの信号を１ｃｈ、ディスクリミネーターからの信号を２ｃｈに表示している。

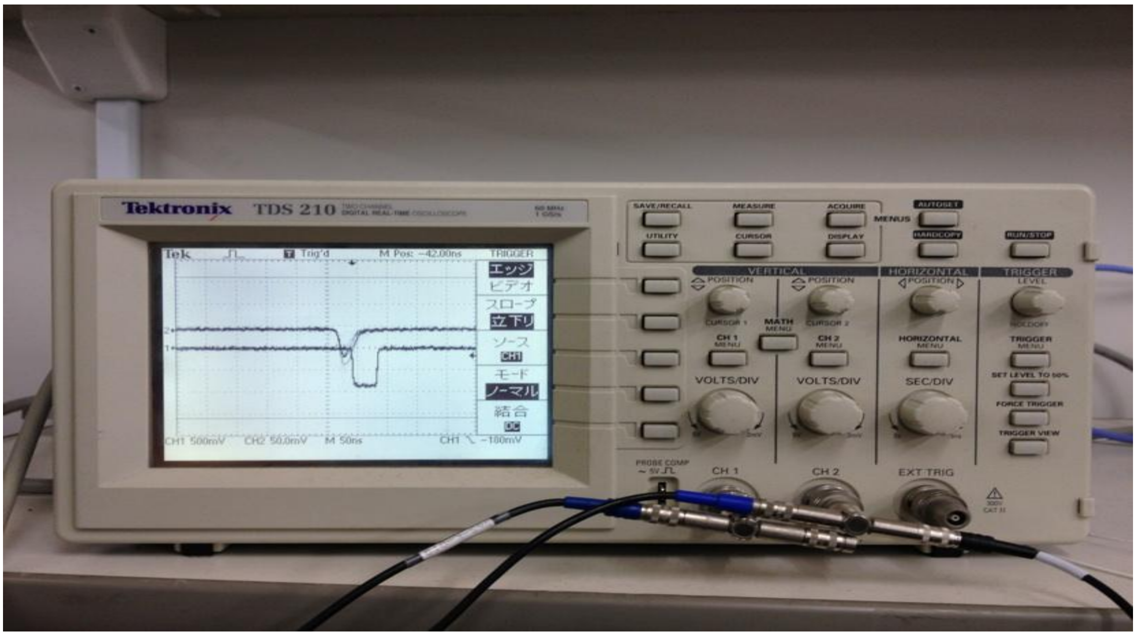


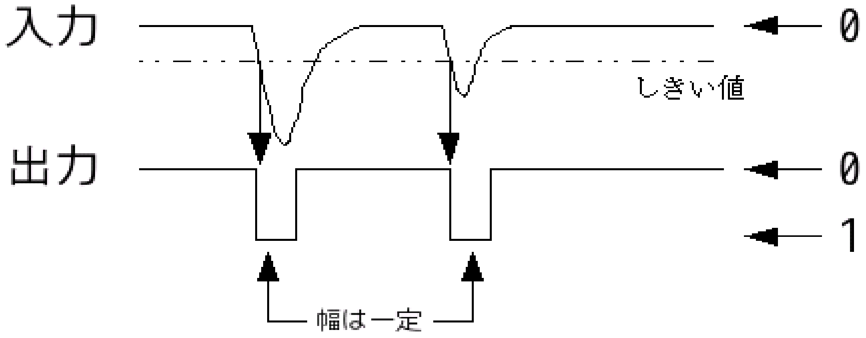
図５：オシロスコープ

③　AMP

オシロスコープから来る電気信号を増幅させる装置

④　ディスクリミネーター

ディスクリミネーターでしきい値を決め、そのしきい値を超えるアナログ信号が入力されたとき、その電圧を超えた時刻を起点としてデジタル信号を出力する装置



④ディスクリミネーター　　　　　　③AMP

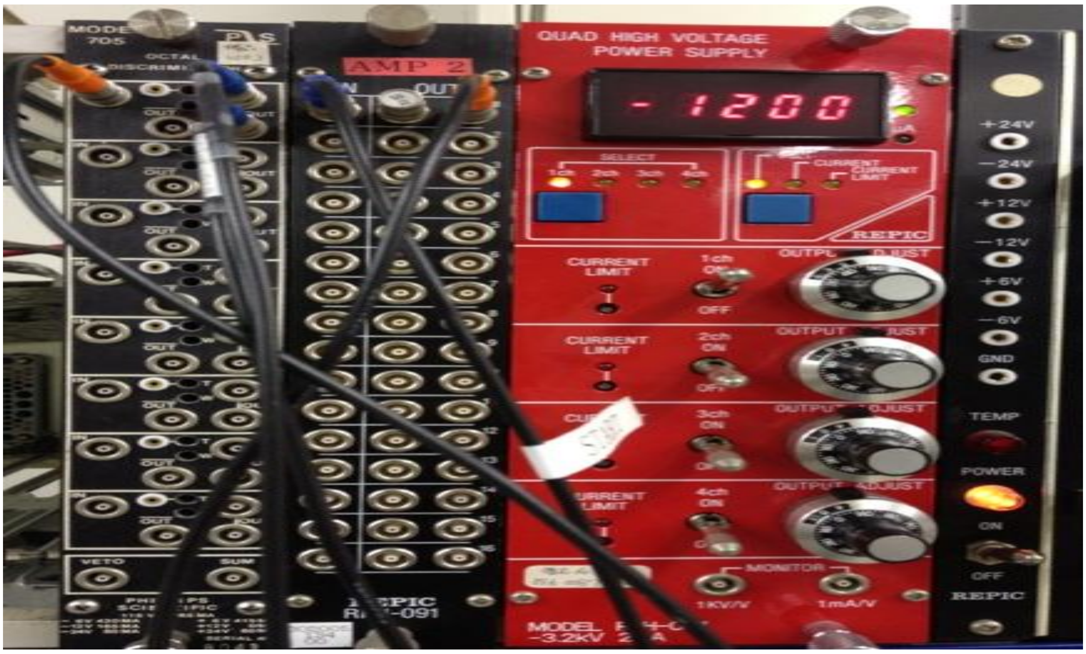
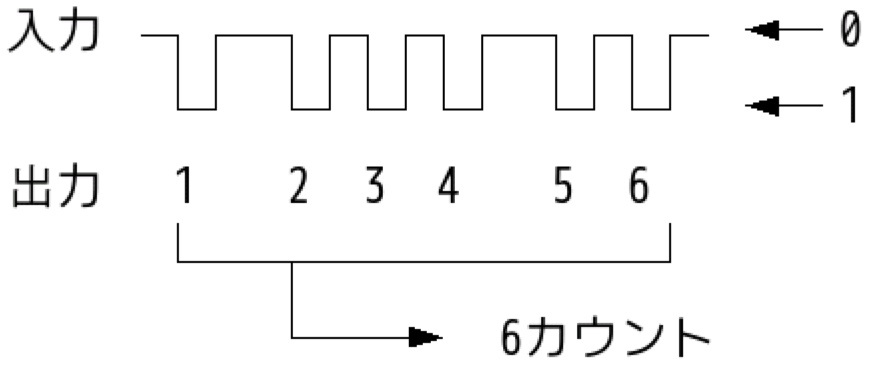


図６：ディスクリミネーターと AMP

⑤　スケーラー

ディスクリミネーター決めたしきい値を超えた信号（デジタル信号）の数をカウントする。



⑥　CAMAC

コンピュータとの通信およびディスクリミネーターなどのモジュールの制御を行う

⑦　PC

スケーラーでカウントしたデジタル信号数を表示する。

実験の流れ

暗箱にシャッター、冷却装置、光電子増倍管、試料を設置する。シャッターは 1 分ごとに開閉し、光電子増倍管の周りには冷却装置を置くことで、熱ノイズを減らす。

暗箱には暗幕をかぶせ、外の光を遮断する。

光電子増倍管で試料からでるバイオフォトンを光電子に変え増幅させる。増幅された電子は電流としてオシロスコープを通るときに電圧に変化させる。ディスクリミネーターで閾値を決めそれを超える電圧だけをスケーラーでカウントし、カウントした結果をCAMACを通してPCに送る。そのデータを解析することできゅうりから出たバイオフォトンを調べる。

6：実験方法

きゅうりの個体差を減らすため、1 本のきゅうりから ^{137}Cs で被ばくさせるのと被ばくさせないきゅうりを切り出す

図 7：きゅうり

・^{137}Cs で被ばくさせない場合

1　きゅうりを 2ｃｍ幅に切って 1 時間放置する。（^{137}Cs で被ばくさせる時間が 1 時間なので条件を同じにするため、^{137}Cs で被ばくさせないきゅうりも 1 時間放置する。）

2　暗箱の中にあるシャッターから 4ｃｍ離して設置し、蓋を閉めて暗幕をかぶせて外からの光が入ってこないようにする。

3　光電子増倍管に－1200V の電圧をかける。シャッターは 1 分おきに開閉しきゅうりのバイオフォトンとバックグラウンドを 2 日間計測する。

^{137}Cs で被ばくさせる場合

1　^{137}Csから2ｍｍ離して2ｃｍ幅に切ったきゅうりを設置し、1時間被ばくさせる。被ばく線量は4.5・9・13.5・18mＳｖの4種類。

2　暗箱の中にあるシャッターから 4ｃｍ離して設置し、蓋を閉め暗幕をかぶせて外からの光が入ってこないようにする。

3　光電子増倍管に−1200V の電圧をかける。シャッターは1分おきに開閉し被ばくしたきゅうりのバイオフォトンとバックグラウンドを 2 日間計測する。

^{137}Cs で被ばくさせたきゅうりのバイオフォトンと、被ばくさせない時のきゅうりのバイオフォトン数を比較することで、低線量被ばくの影響を調べる。

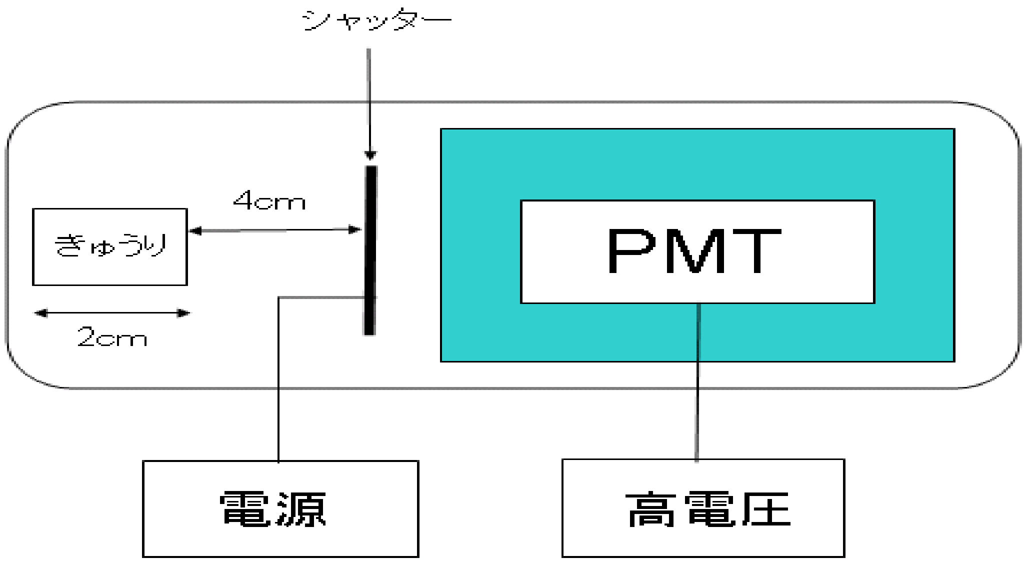


図８：暗箱の中の様子

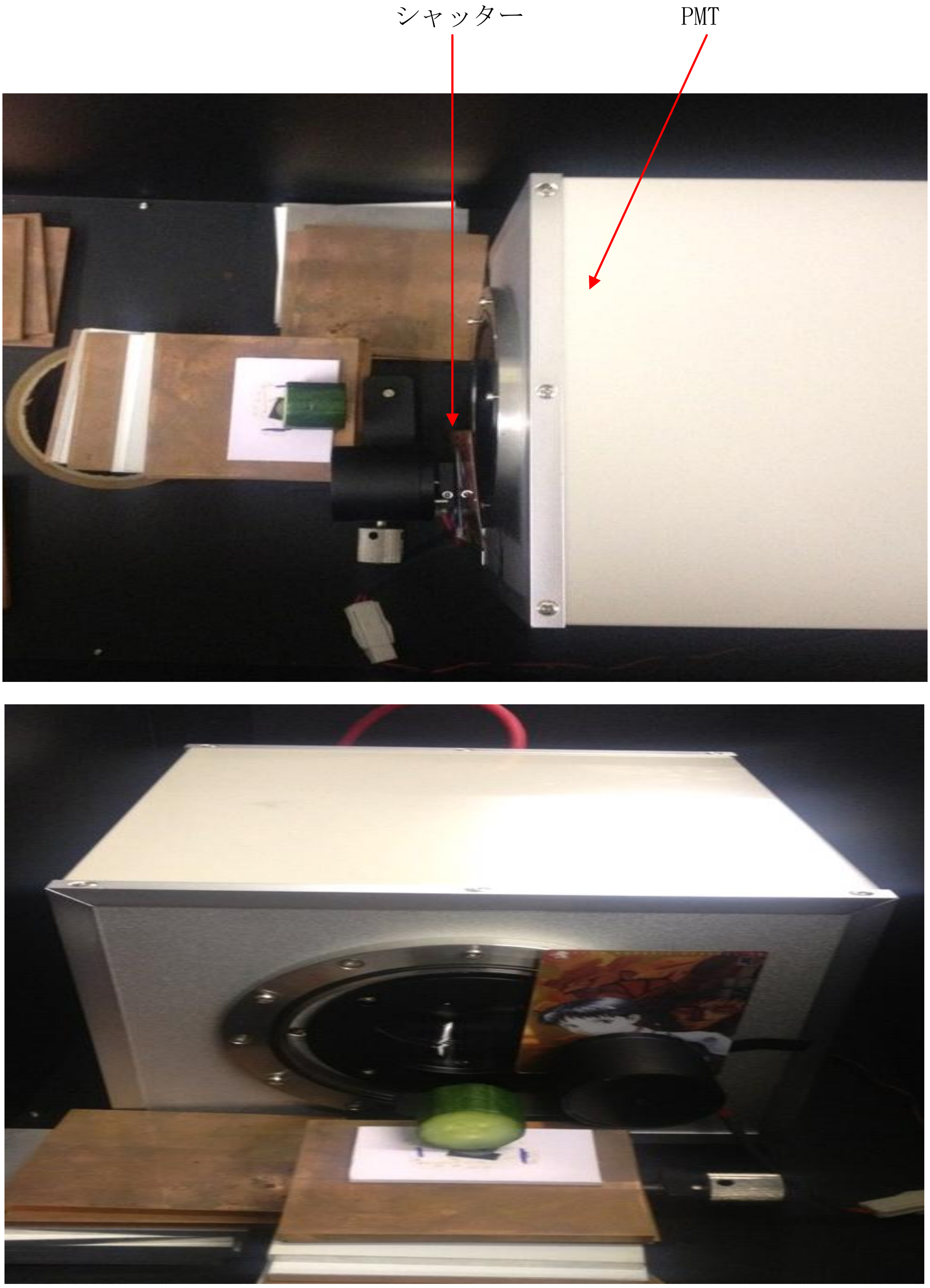


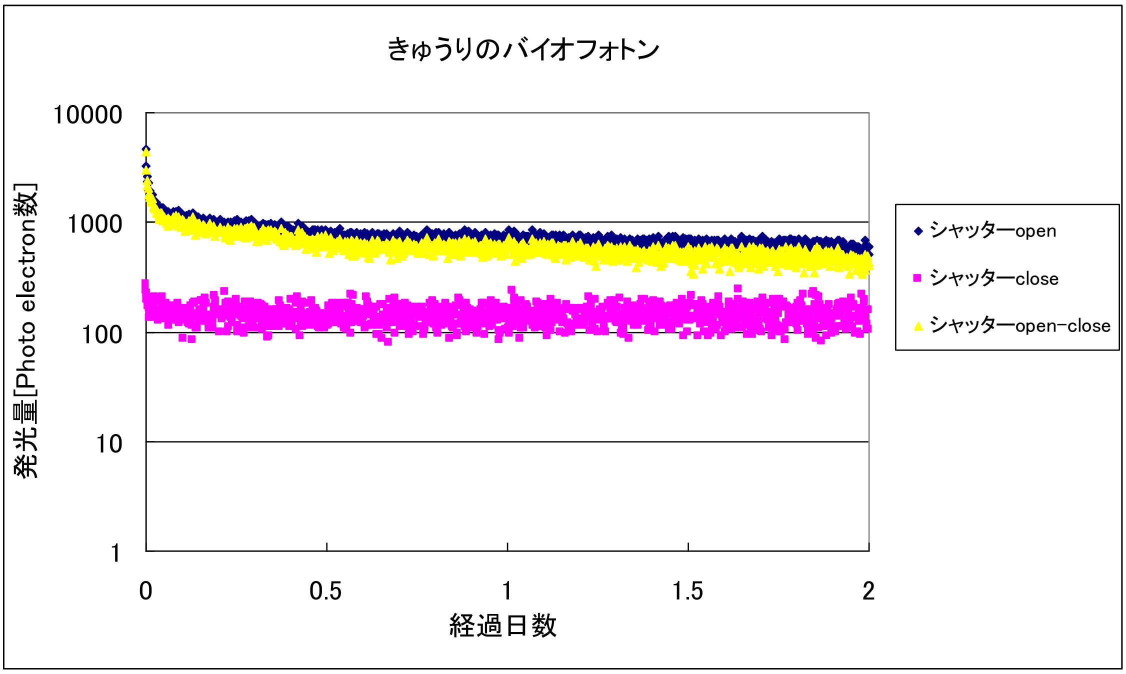
図９：実際の暗箱の中の写真

7：実験結果

①4.5mSv

1時間被ばくさせたきゅうりと被ばくさせないきゅうりのバイオフォトンを測定した。
青色の点：シャッターopen の時のバイオフォトン数
ピンクの点：シャッターclose の時のバイオフォトン数（バックグラウンド）
黄色の点：シャッターopen から close を引いた差分のバイオフォトン数

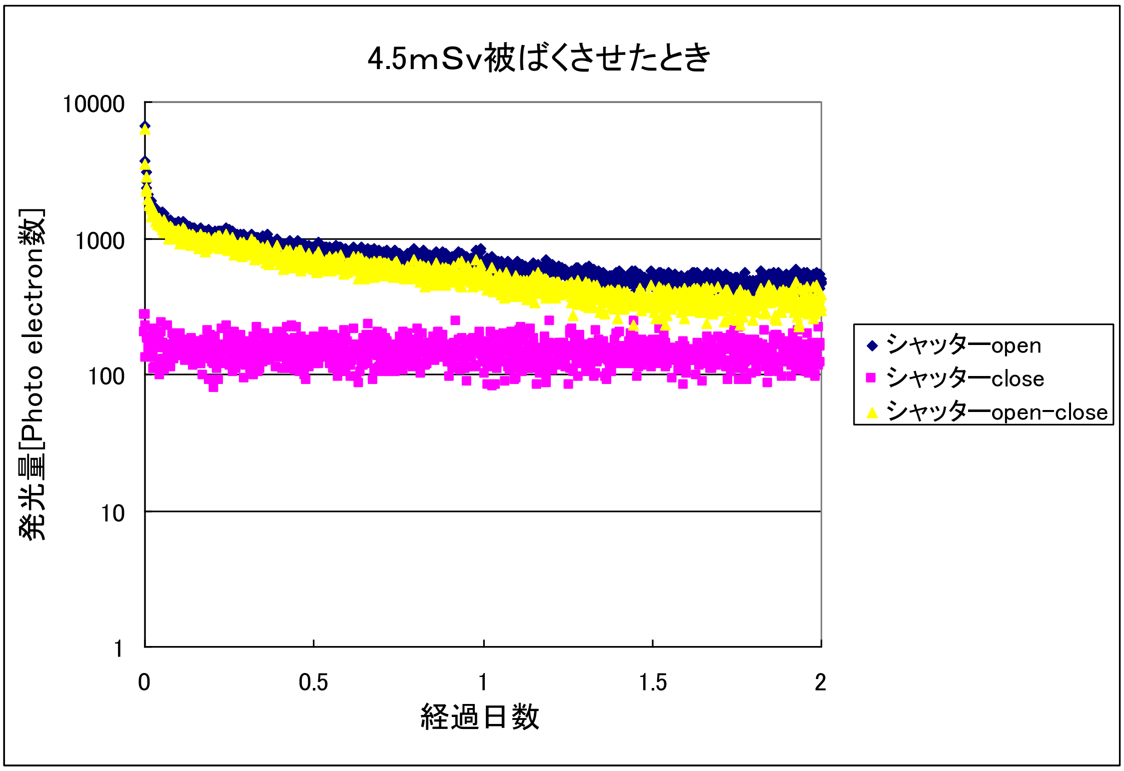
<u>つまり黄色の点がきゅうりから実際に出たバイオフォトンである。</u>



グラフ1：きゅうり

グラフ 1 を見てもわかるように日にちが経つにつれてバイオフォトン数は減少していることがわかるが、2 日間放置してもバイオフォトンは放出していることがわかる。実験を始めてすぐのときにバイオフォトンが多く測定されている。それはきゅうりがまだ新鮮だったのと冷却装置がまだ完全に稼動しておらず、光電子増倍管の冷却が間に合わなかったと考えられる。

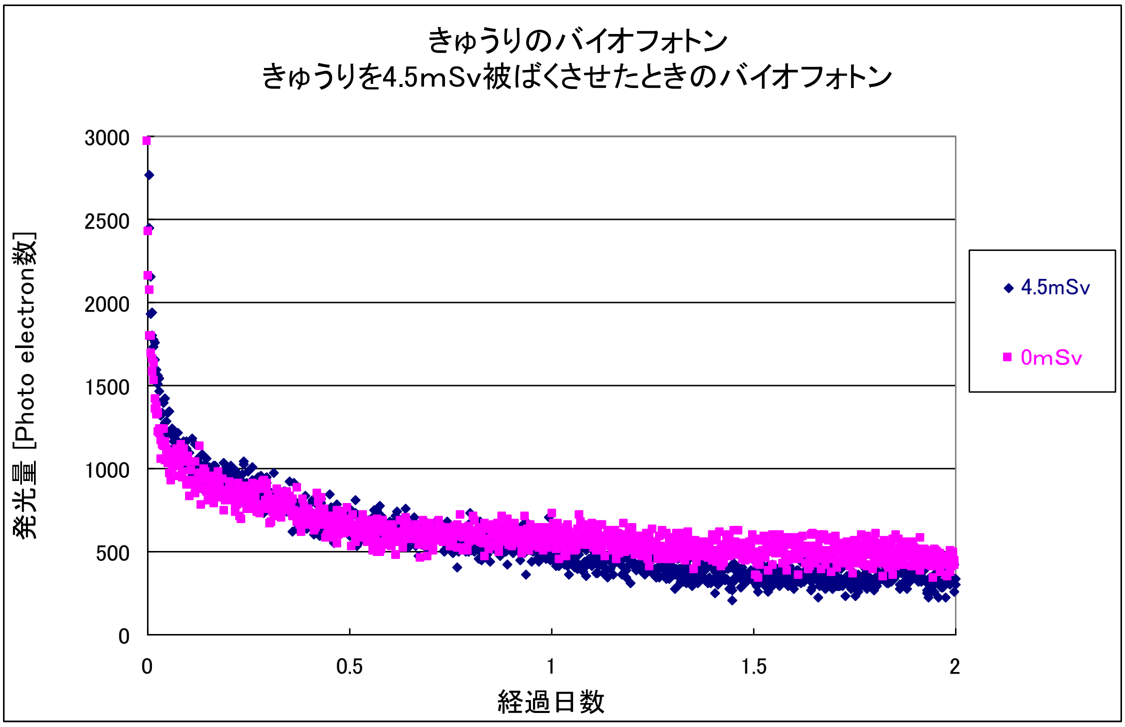
次にきゅうりに ^{137}Cs を 1 つ置き 1 時間（4.5mSv）被ばくさせたときのきゅうりのバイオフォトン数を測定した。



グラフ 2：4.5mSv 被ばくさせたきゅうり

グラフ 2 を見てもわかるように ^{137}Cs を 1 時間（4.5mSv）当てたときも日にちが経つにつれてバイオフォトン数は減少していることがわかる。
そして、被ばくさせていないときと同様、2 日間放置してもバイオフォトンは放出していることがわかる。

被ばくさせていないきゅうりと ^{137}Cs を使って被ばくさせているきゅうりの両方とも 2 日間放置してもバイオフォトンが放出されていることがグラフからわかる。
では被ばくさせていないきゅうりと ^{137}Cs を使って被ばくさせたきゅうりとではどちらが多くバイオフォトンを放出しているのか比較した。

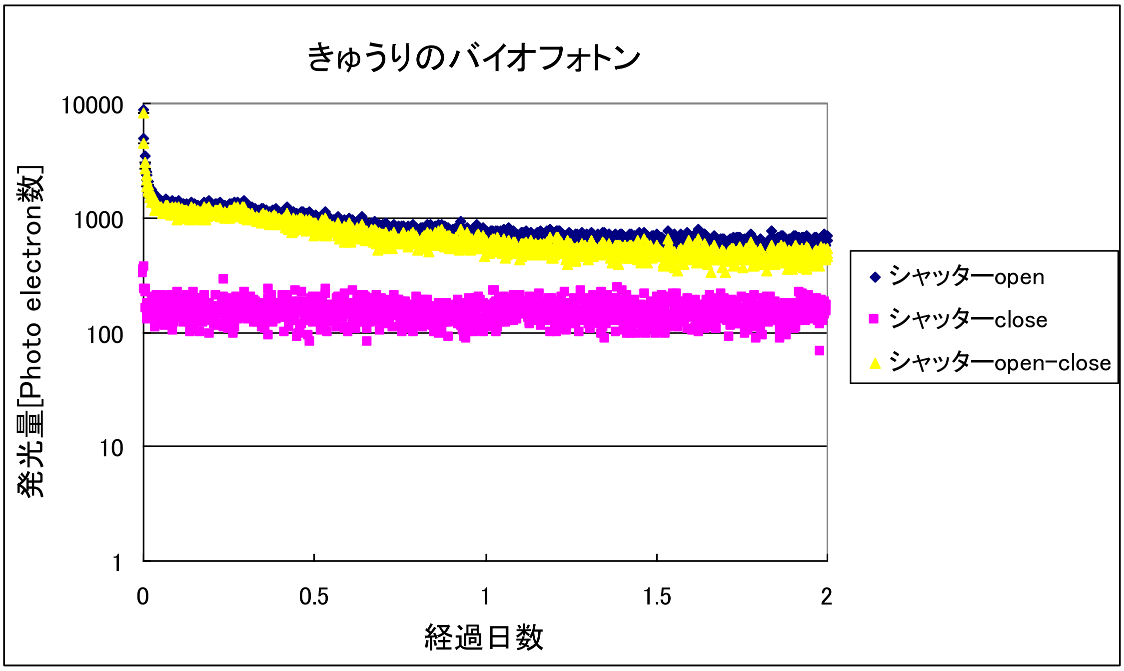


グラフ３：きゅうりと ^{137}Cs を使って 4.5mSv 被ばくさせたきゅうり

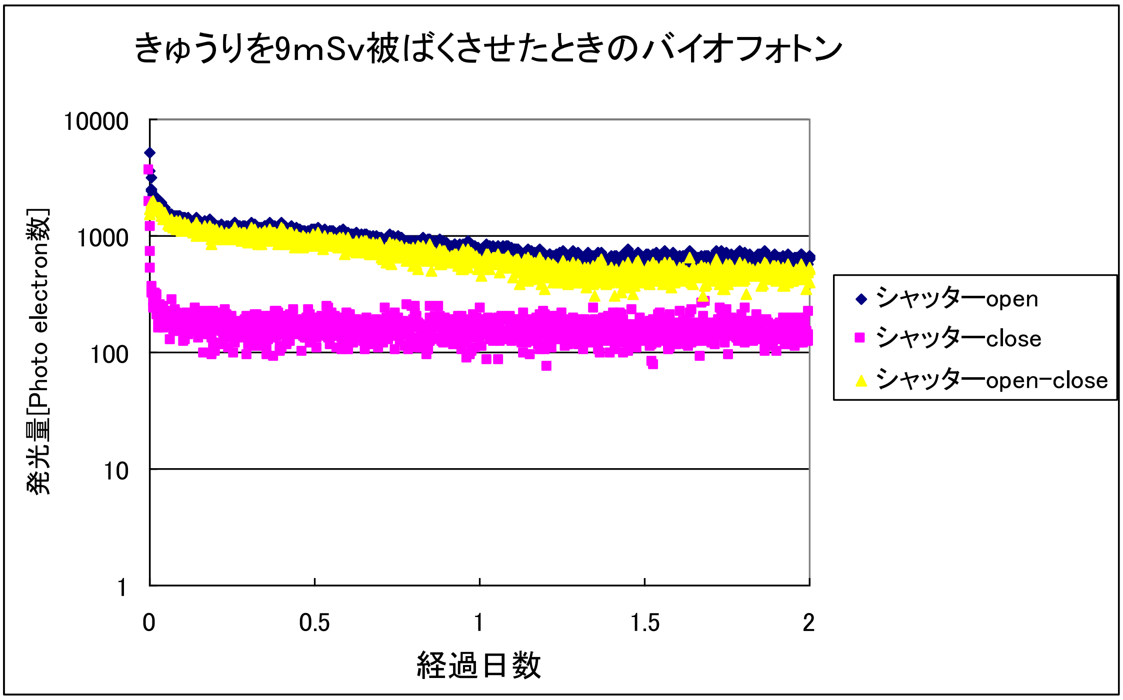
グラフ３より、測定を始めて 0.7 日ぐらいは、^{137}Cs を１時間（4.5mSv）被ばくさせたときのほうがバイオフォトンは放出されているが、それ以降は被ばくさせていないきゅうりのほうがバイオフォトン数は多いことがわかる。

次は ^{137}Cs を２つ置き１時間被ばく（9mSv）させたときのきゅうりと被ばくさせていないきゅうりのバイオフォトン数を調べる。

② 9 mSv



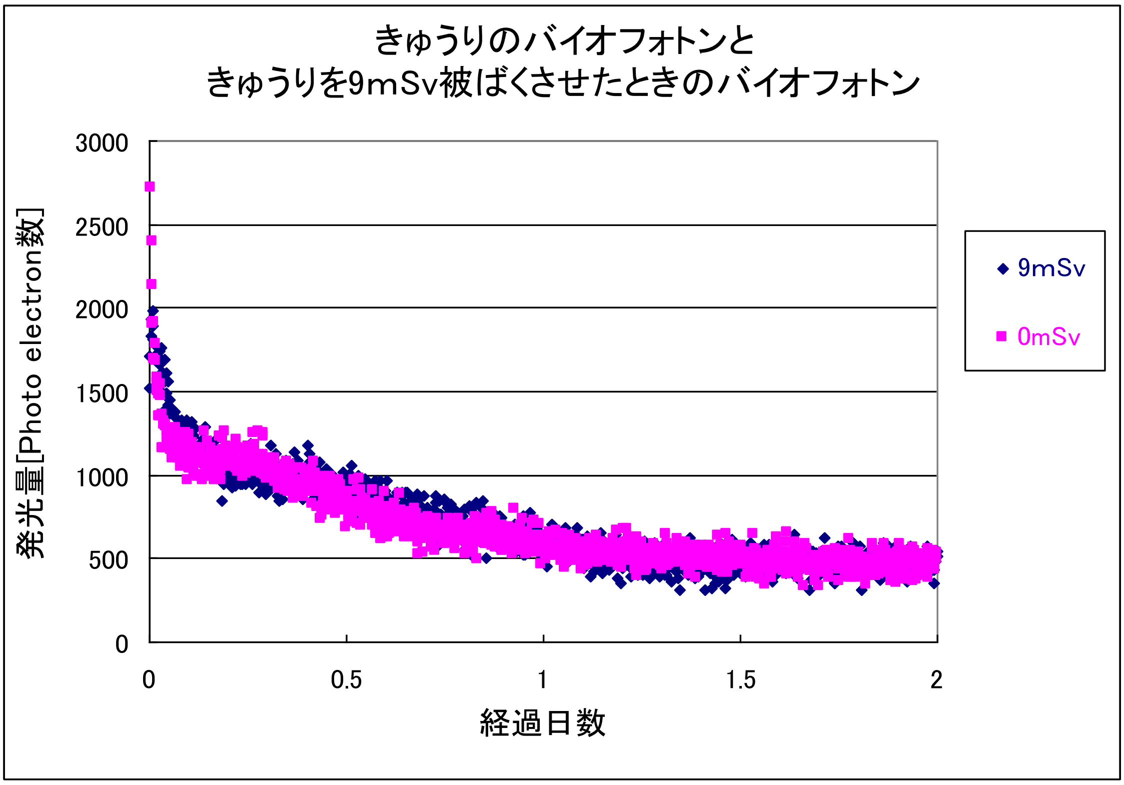
グラフ４：きゅうり



グラフ５：9mSv 被ばくさせたきゅうり

いままでの結果と同じく ^{137}Cs を使って 9mＳv 被ばくさせたきゅうりからも
バイオフォトンが出ていることがわかる。
4.5mＳv 被ばくさせきゅうりと被ばくさせていないきゅうりでは、被ばくさせていないきゅうりのときのほうが最終的にバイオフォトンが出ていることがグラフ 3 でわかった。

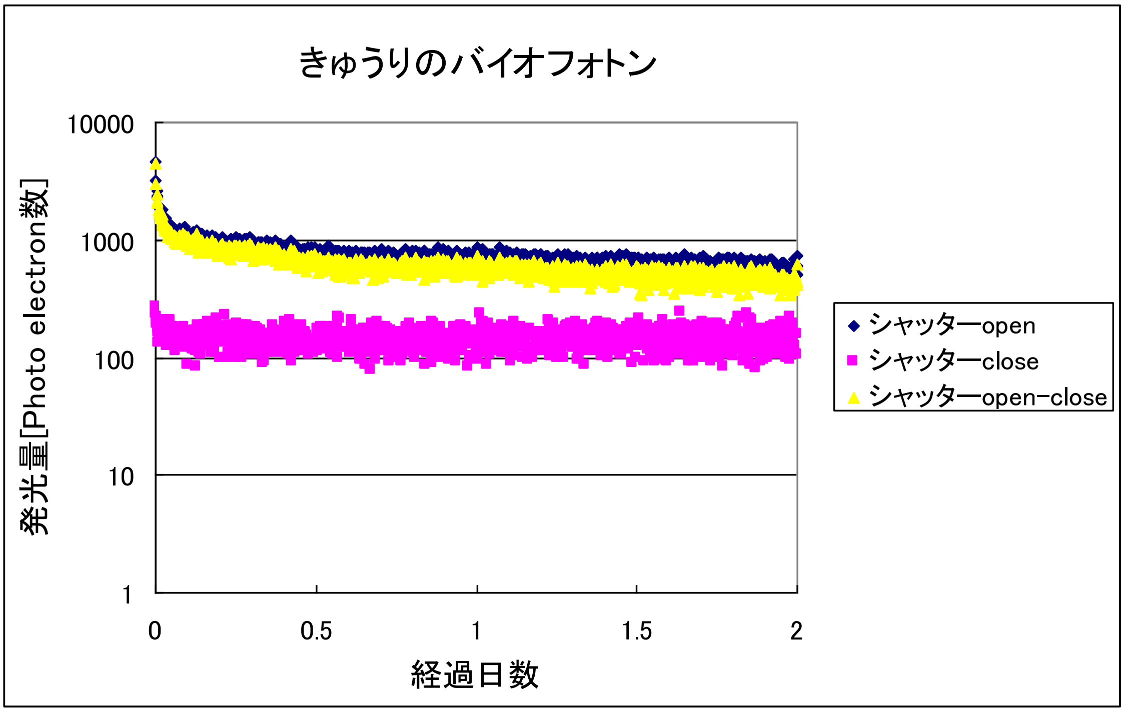
では、きゅうりと 9mSv 被ばくさせたきゅうりではどちらにバイオフォトンが多く出ているか調べる。



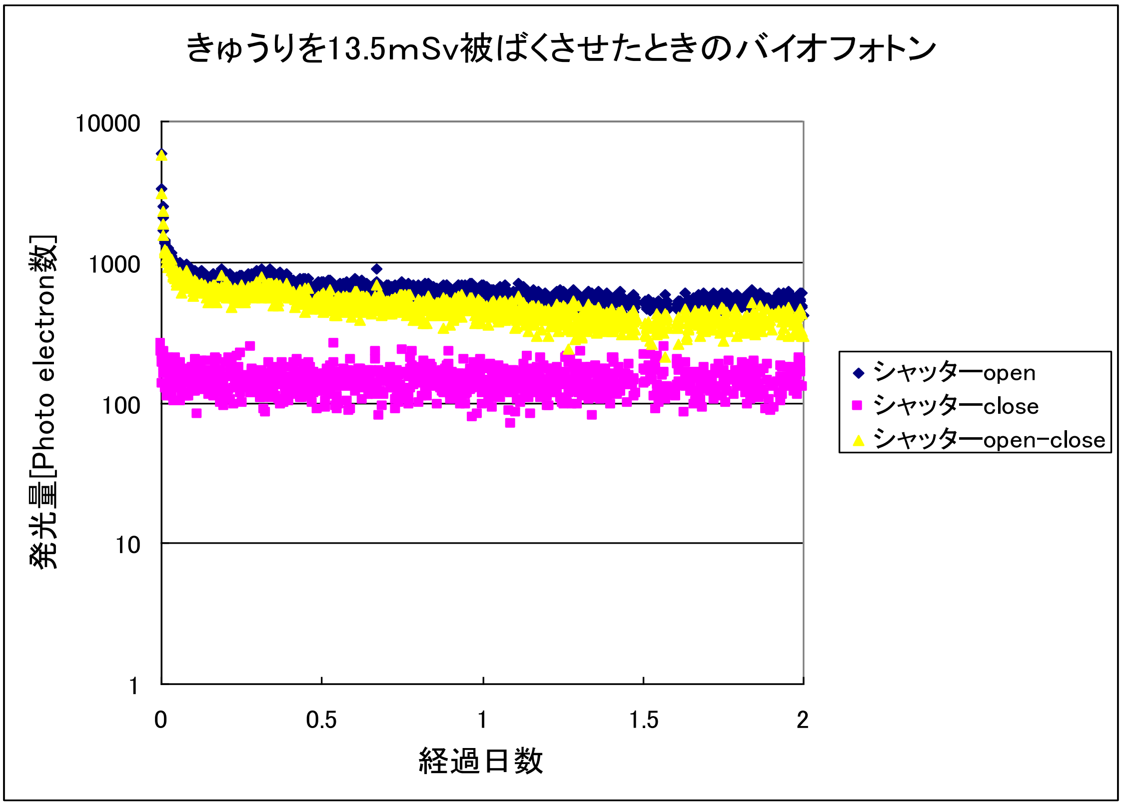
グラフ 6：きゅうりと ^{137}Cs を使って 9mSv 被ばくさせたきゅうり

グラフ 3 とは少し違い、きゅうりのバイオフォトンときゅうりを 9mSv 被ばくさせたときのバイオフォトンがほぼ一致していることがわかる。
しかし、きゅうりの大きさや鮮度によってきゅうりからでるバイオフォトン数は異なるので線量を上げたことにより、グラフがほぼ重なったかどうかは
この程度の変化では判断はできない。
さらに被ばく線量をあげて実験を行う。

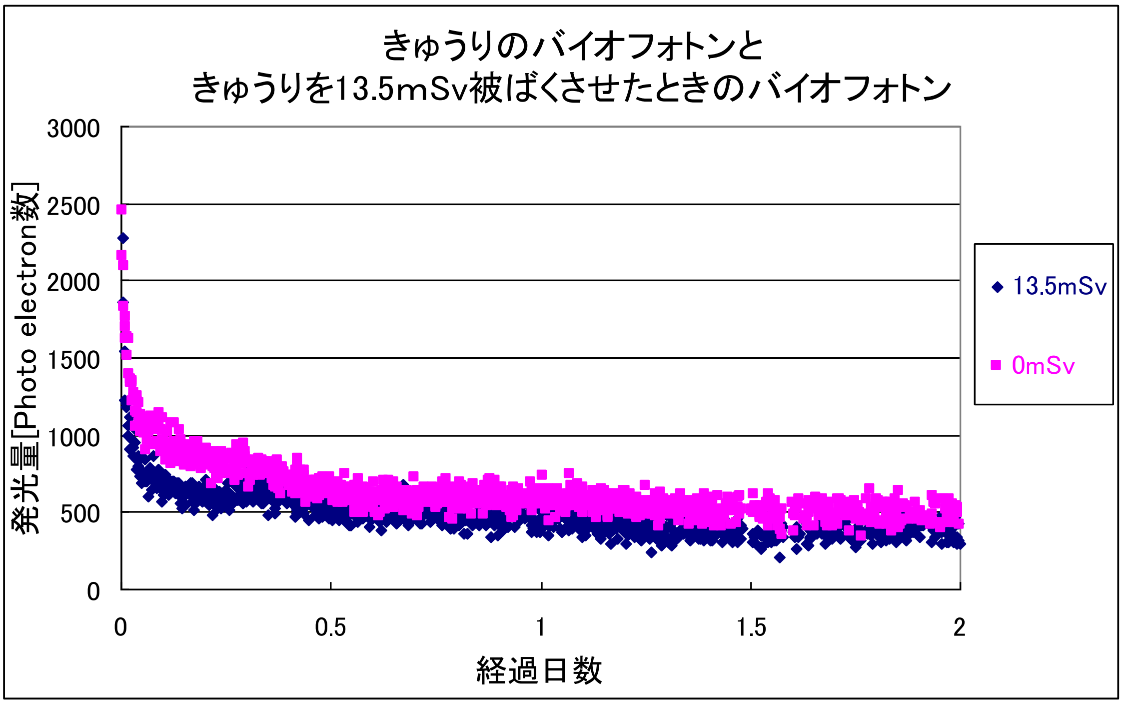
③13.5mSv



グラフ7：きゅうり



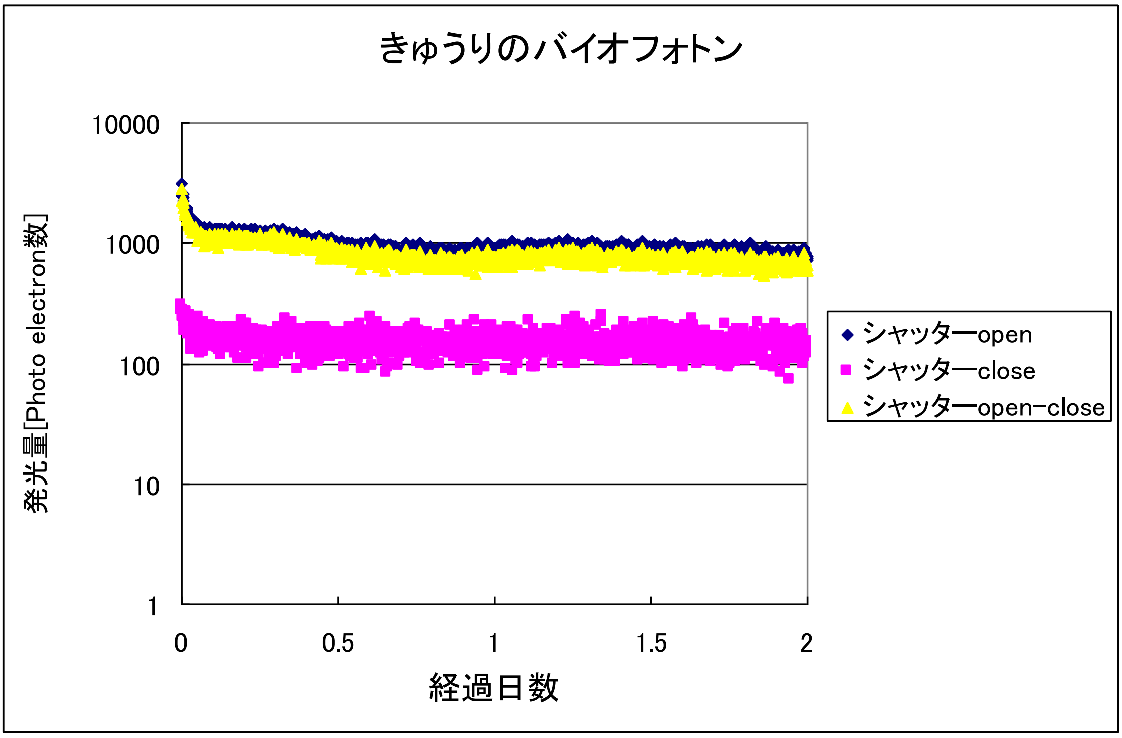
グラフ8：13.5mSv 被ばくさせたきゅうり



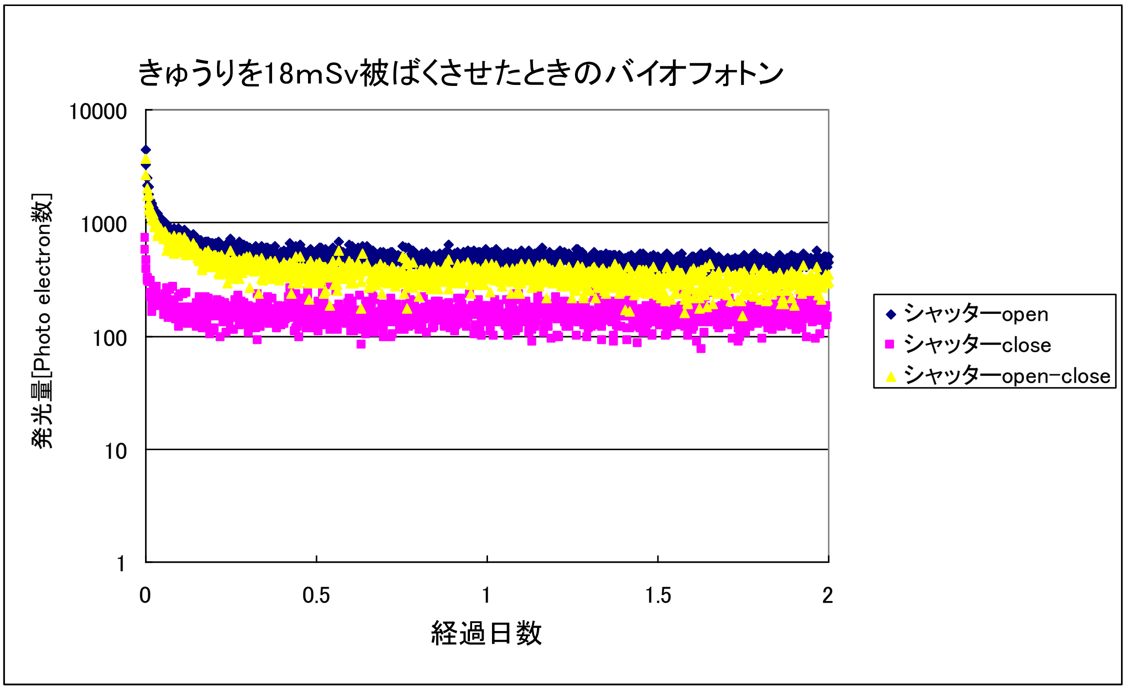
グラフ 9：きゅうりと ^{137}Cs を使って 13.5mSv 被ばくさせたきゅうり

グラフ 3 やグラフ 6 の結果では放射線の影響によるバイオフォトンの増減がわかりにくかったが 13.5mSv のときは実験を始めてからずっと、13.5mＳｖ被ばくさせたきゅうりのほう被ばくさせていないきゅうりよりバイオフォトンを発していないことがわかる。

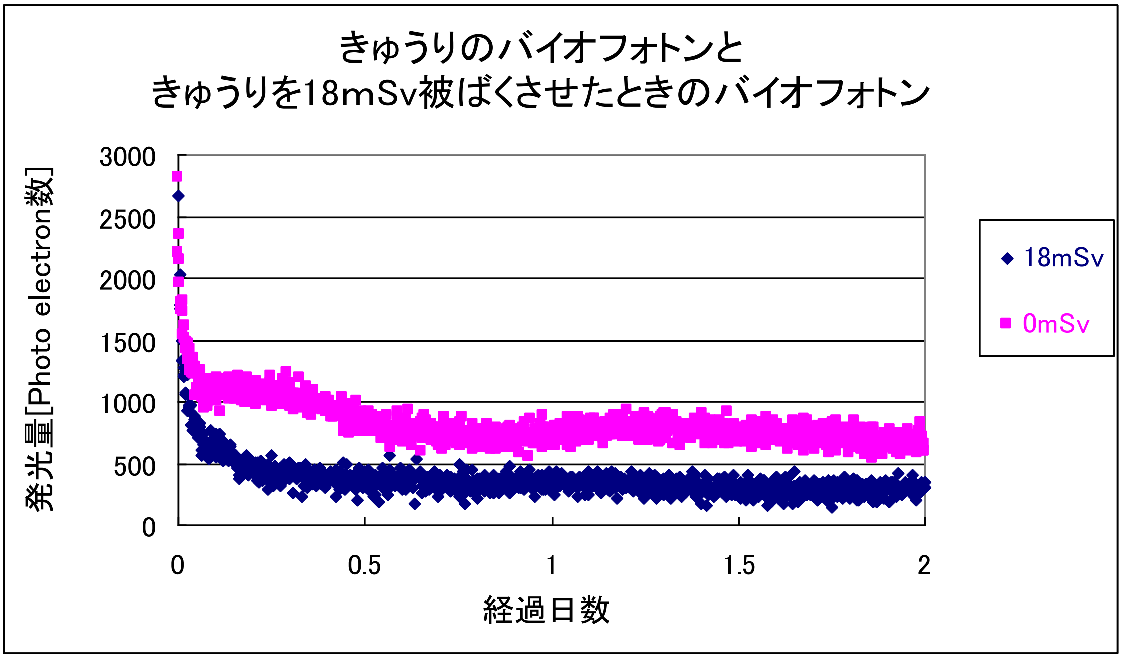
④18mSv



グラフ 10：きゅうり



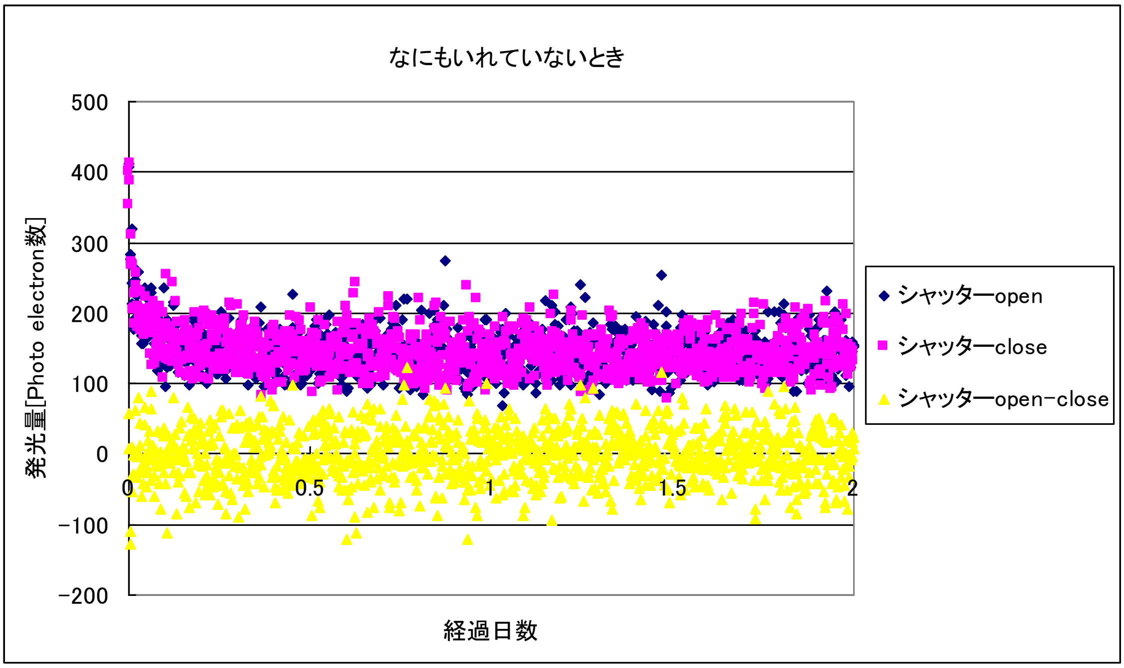
グラフ 11：18mSv 被ばくさせたきゅうり



グラフ 12：きゅうりと ^{137}Cs を使って 18mSv 被ばくさせたきゅうり

いままでのグラフと比べても明らかに 18mSv 被ばくさせているきゅうりのほうがバイオフォトンは発していないことがわかる。つまり、放射線量を増やすと生命活動になんらかの影響があると予想される。
次に暗箱になにもいれずに測定を行い、実験装置のノイズを測定する。

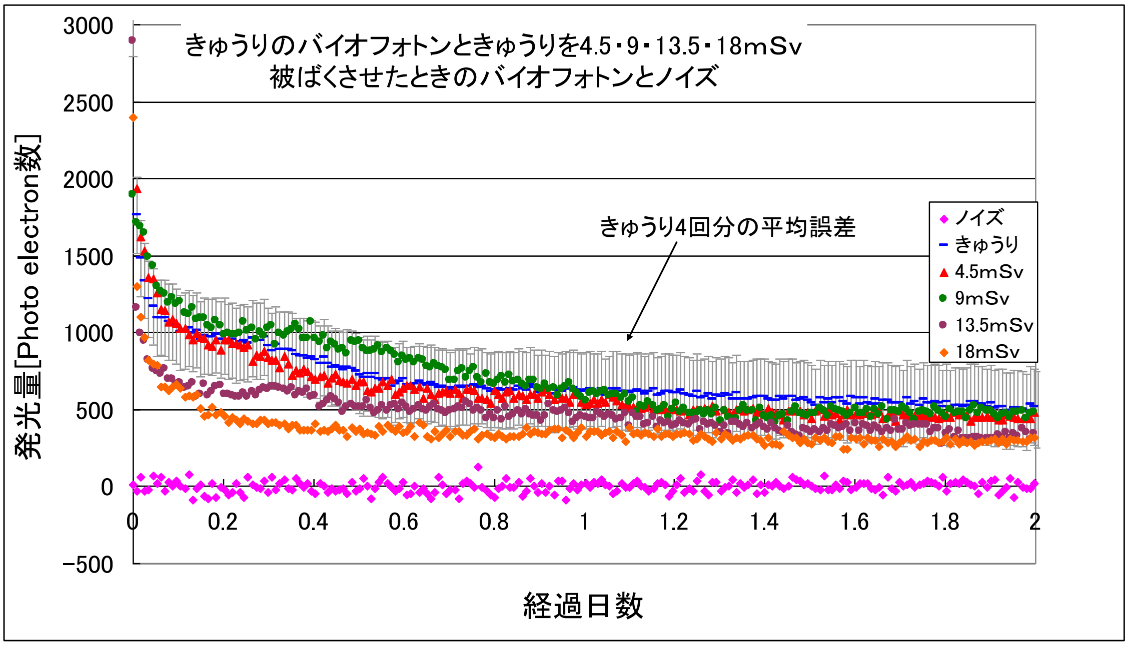
⑤実験装置のノイズ



グラフ 13：実験装置のノイズ

おおよそ-100 から 100 の間にノイズが収まっており、ほとんどの点が 0 点にある。つまり、いままでの実験で測定したバイオフォトン数はノイズの影響がすくないことがわかる。

いままでのグラフを 1 つのグラフにまとめて比較を行う。



グラフ１４：きゅうりと 4.5・9・13.5・18mSv 被ばくさせたきゅうりの
バイオフォトンと実験装置のノイズ

4.5・9・13.5・18mＳｖ被ばくさせたきゅうりときゅうりのバイオフォトンは
おおよそ１日目を過ぎる頃から発光量はあまり変化していないことがわかる。
これはきゅうりの細胞が１日目を過ぎる頃から死に始めていると予想される。

被ばく線量を多くしたほうがバイオフォトン数は少なくなる傾向にあることが
わかった。
ではどれぐらい放射線の影響でバイオフォトン数が変化したか調べる。

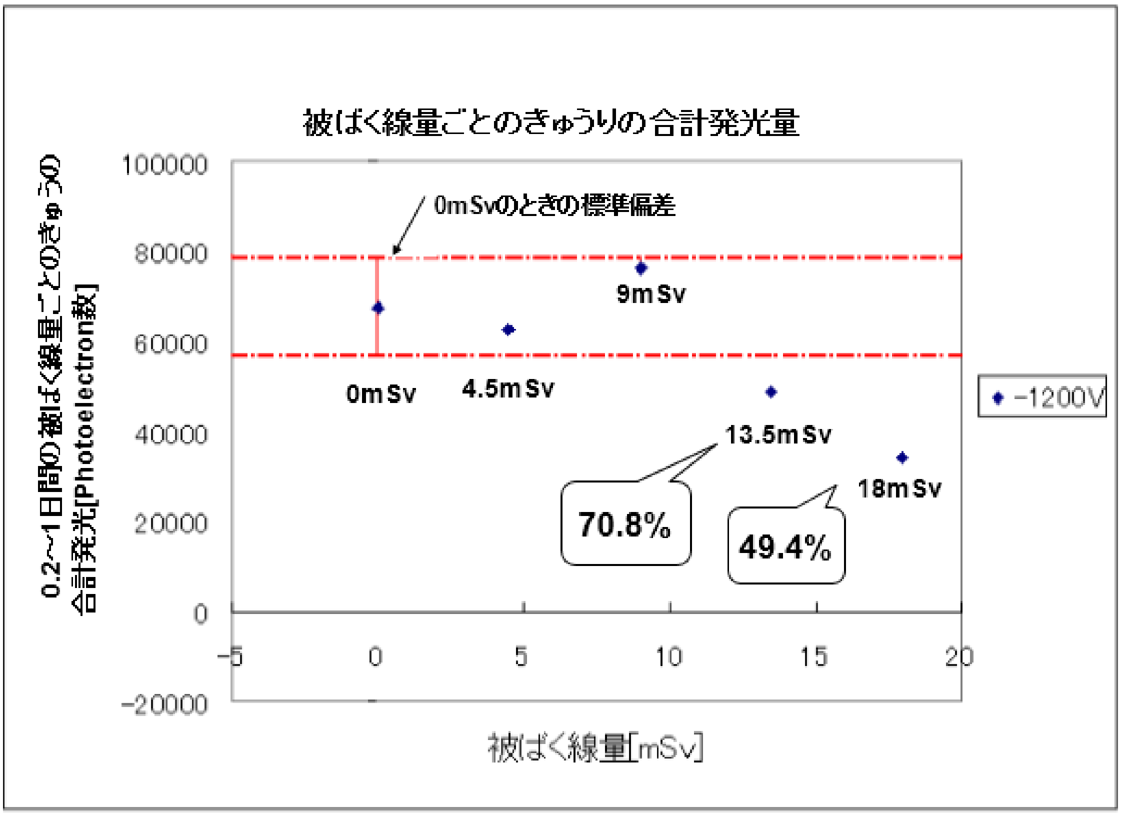


図 15：0.2～1 日間の合計バイオフォトン数の合計

図 15 が 0.2～1 日間のバイオフォトン数の合計。4.5・9mＳｖの合計バイオフォトン数はきゅうり 4 回分の標準偏差内に収まっている。
13.5・18mＳｖは範囲外であるが 2σの範囲に収まっており、このデータだけでは本当に被ばく線量があがるとバイオフォトン数が減少するとは断定できない。

被ばくさせていないきゅうりの発光量を基準とすると 13.5mSv 被ばくのときの発光量は 70.8%。18mSv 被ばくのときの発光量は 49.4%となった。

８：考察

4.5～９mＳｖ被ばくさせたきゅうりでは発光量が多くなったが
１０mＳｖ以上被ばくさせたきゅうりでは発光量は少なくなる傾向がある。
しかし、被ばく線量をあげるとバイオフォトン数に影響が出るとは判断が難しい。この傾向を確定するために繰り返し測定を行い、測定精度を上げ、
きゅうりによる統計誤差を減らす必要がある。

９：参考文献

1　原子力発電施設等放射線業務従事者等に係る疫学的調査
2　デジタル・リアルタイム・オシロスコープ　ＴＤＳ210 型　取り扱い説明書
3　浜松ホトニクス　高電子増倍管(R694S) 取扱説明書
4　http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g5.html

１０：謝辞

本研究を進めるにあたり、宇宙粒子研究室の梶野教授、山本准教授には貴重な時間、助言、様々なご指導を頂き感謝いたします。
また、大学院生、4 回生の皆様の協力によってこの論文が完成いたしました。
この場をお借りしましてお礼申し上げます。